

УДК 622.692.4.052

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ У ЗОНІ ЗМІШАНОГО ТЕРТЯ ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМУ

Н.В. Люта, Й.В. Якимів, М.Д. Середюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727139,  
e-mail: tznng@nuing.edu.ua

Ефективний коефіцієнт дифузії є найбільш важливим параметром послідовного перекачування різносортих рідин. Він не тільки характеризує інтенсивність сумішоутворення рідин, але і визначає практично всі технологічні параметри даної технології трубопроводного транспорту. Більшість математичних моделей для ефективного коефіцієнта дифузії одержані за умов послідовного перекачування світлич нафтопродуктів. Питання обчислення вказаного коефіцієнта при послідовному перекачуванні малов'язких нафт різних сортів вимагає додаткових досліджень, які виконані у даній роботі. Для визначення ефективного коефіцієнта дифузії вибрано аналітичний спосіб, який враховує структуру турбулентного потоку у зоні змішаного тертя турбулентного режиму. В результаті багатоваріантних розрахунків отримано аналітичну залежність для визначення ефективного коефіцієнта дифузії для змішаного закону тертя. Дана модель є зручною для практичних розрахунків параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів у магістральних нафтопроводах, в тому числі зі складною геометричною структурою.

Ключові слова: магістральні нафтопроводи, сумішоутворення, послідовне перекачування, різносорти нафти.

Эффективный коэффициент диффузии является наиболее важным параметром последовательной перекачки разнородных жидкостей. Он не только характеризует интенсивность смесеобразования жидкостей, но и определяет практически все технологические параметры данной технологии трубопроводного транспорта. Большинство математических моделей для эффективного коэффициента диффузии получены в условиях последовательной перекачки светлых нефтепродуктов. Вопрос определения указанного коэффициента при последовательной перекачке маловязких нефтей различных сортов требует дополнительных исследований, выполненных в данной работе. Для определения эффективного коэффициента диффузии выбран аналитический способ, который учитывает структуру турбулентного потока в зоне смешанного трения турбулентного режима. В результате многовариантных расчетов получена аналитическая зависимость для определения эффективного коэффициента диффузии для смешанного закона трения. Данная модель удобна для практических расчетов параметров последовательной перекачки нефтей различных сортов в магистральных нефтепроводах, в том числе со сложной геометрической структурой.

Ключові слова: магистральные нефтепроводы, смесеобразование, последовательная перекачка, разнотипные нефти.

The effective diffusion coefficient is the most important parameter of batching of different kind liquids. It does not only characterize the intensity of mixing of the liquids, but also determines practically all the technological parameters of the given technology of pipeline transportation. The majority of mathematical models for the effective diffusion coefficient were obtained under the conditions of batching of light-oil products. The coefficient calculation under the conditions of batching of different kind low-viscosity oils requires additional studies that were executed in this article. To determine the effective diffusion coefficient, analytical approach was chosen. It takes into account the structure of the turbulent flow in the mixed friction area of the turbulent mode. As a result of the multiple path calculations, an analytical model for determining the effective diffusion coefficient was obtained. The model is suitable for practical calculations of the parameters of batching of different kind oils in the main oil pipelines, including the pipelines with complicated geometrical structure.

Keywords: main oil pipeline, mixing of oils, batching, different kind oils.

**Актуальність теми.** Під час послідовного перекачування світлич нафтопродуктів діапазон зміни кінематичної в'язкості досить вузький і практично вкладається у проміжок від 1 до 10 сСт. Послідовно транспортовані нафти можуть мати значно ширший діапазон значень кінематичної в'язкості від кількох сантстокс до стокса. Послідовне перекачування різносортих нафт може реалізовуватись у магістральних нафтопроводах, діаметр яких в межах України змінюється від DN=300 мм до DN=1200 мм. Витрата нафти у магістральних нафтопроводах також може коливатись у широкому діапазоні залежно від ступеня їх завантаження. Таким чином, з точки зору гідродинаміки, процеси сумішоутворення при послідовному перекачу-

ванні нафт мають ряд особливостей, порівняно з процесами перемішування світлич нафтопродуктів. Залежно від співвідношення геометричних характеристик нафтопроводу, ступеня його завантаження і фізичних властивостей нафт послідовне перекачування нафти може відбуватись у широкому діапазоні критерію Рейнольдса – від  $Re = 10000$ , що відповідає зоні гідравлічно гладких труб до  $Re = 200000 - 300000$ , що відповідає зоні змішаного тертя турбулентного режиму. Тому актуальним завданням є отримання математичної моделі для ефективного коефіцієнта дифузії, яка може врахувати особливості сумішоутворення різносортих нафт у зоні змішаного закону тертя турбулентного режиму.

**Мета і задачі досліджень** – дослідити закономірності сумішоутворення різносортих нафт за умов їх послідовного перекачування трубопроводом, одержати аналітичні залежності ефективного коефіцієнта дифузії для зони змішаного тертя турбулентного режиму.

**Об'єкт дослідження** – магістральні нафтопроводи, якими здійснюється перекачування малов'язких нафт з суттєвою різницею фізичних властивостей та показників якості.

**Предмет дослідження** – дифузійні процеси в нафтопроводах за умов послідовного перекачування різносортих нафт у зоні змішаного закону тертя турбулентного режиму.

**Методи дослідження:** методи математичного аналізу, математичного моделювання та інтерпретації.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.** Теоретичними і практичними аспектами послідовного перекачування світлич нафтопродуктів займалися засновники московської наукової школи В.С. Яблонський, В.І. Чернікін, В.О. Юфін, М.В. Лур'є, В.І. Марон, представники уфимської наукової школи М.В. Нечваль, А.Ш. Асатурян, В.Ф. Новосолов, П.І. Тугунов. В Україні питаннями послідовного перекачування нафтопродуктів займалися К.Д. Фролов, І.Х. Хізгілов, М.Д. Середюк, С.С. Шнерх, Й.В. Якимів. Помітний внесок у теорію сумішоутворення рідин при послідовному перекачуванні зробили вчені далекого зарубіжжя Д. Тейлор, Ф. Фоулер, Г. Броун, Ф. С'енітцер, Р. Аріс, Х. Балей, В. Хогарті, Л. Тіхасек. Особливо значна роль робіт Тейлора, які мали вирішальний вплив на всі подальші дослідження з даної тематики.

Ефективний коефіцієнт дифузії характеризує інтенсивність повздовжнього перемішування рідин у трубопроводі. Його величина суттєво відрізняється від коефіцієнтів молекулярної та турбулентної дифузії. Математичну модель ефективного коефіцієнта дифузії можна одержати дослідним шляхом або шляхом розв'язування просторової задачі змішування рідин у трубопроводі [1,5].

Найбільш загальний вираз для ефективного коефіцієнта дифузії пропонується у роботі [2]

$$D_e = \varepsilon_o + \frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{dr}{r\varepsilon} \left[ \int_r^R (U - U_o) r' dr' \right]^2, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_o$  – осереднене за площею поперечного перерізу труби значення коефіцієнта турбулентної дифузії

$$\varepsilon_o = \frac{1}{s} \iint_s \varepsilon d\delta, \quad (2)$$

$R$  – радіус трубопроводу;

$U$  – осереднена швидкість на віддалі  $r$  від осі труби;

$\varepsilon$  – коефіцієнт турбулентної дифузії.

Формула (1) вказує на основні фактори, від яких залежить величина ефективного коефіцієнта дифузії – це профіль повздовжньої швид-

кості  $U$  і коефіцієнт перенесення речовини перерізом труби  $\varepsilon$ . Слід зазначити, що вираз (1) має формальний характер і не може бути безпосередньо використаний для обчислення ефективного коефіцієнта дифузії. Тільки після підстановки у формулу (1) математичних моделей для профілю швидкості і для коефіцієнта турбулентної дифузії, можна одержати аналітичні вирази для ефективного коефіцієнта дифузії.

Коефіцієнт перенесення речовини у турбулентному потоці дорівнює сумі коефіцієнтів молекулярної  $D_m$  і турбулентної дифузії  $D_t$ . Коефіцієнт  $D_t$  згідно з гіпотезою Бусинеска може бути обчислений за формулою

$$D_t = -U_*^2 \frac{r}{R} \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^{-1}, \quad (3)$$

де  $U_*$  – динамічна швидкість турбулентності,

$$U_* = U_o \sqrt{\frac{\lambda}{8}}. \quad (4)$$

Використавши турбулентний профіль швидкості для однорідного потоку у гідравлічно гладкій трубці, нехтуючи процесом молекулярної дифузії, Тейлор запропонував одну з перших формул для ефективного коефіцієнта дифузії [6]

$$D_e = 1,785 U_o d \sqrt{\lambda}, \quad (5)$$

де  $d$  – внутрішній діаметр трубопроводу;  
 $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору.

Результати досліджень свідчать, що вибраний Тейлором профіль швидкості в турбулентному потоці не зовсім точно апроксимує осереднену швидкість. Тому формула (5) дає занижені результати, особливо при невеликих числах Рейнольдса.

На основі статистичної теорії ізотропної турбулентності В.С. Яблонський, А.Ш. Асатурян, І.Х. Хізгілов [7] запропонували таку модель, яка дає достовірні результати для випадку послідовного перекачування нафтопродуктів у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму

$$\frac{D_e}{\nu} = 17,4 \text{Re}^{2/3}, \quad (6)$$

де  $\nu$  – розрахунковий коефіцієнт кінематичної в'язкості транспортованої рідини.

При послідовному перекачуванні нафтопродуктів у зоні змішаного тертя турбулентного режиму ефективний коефіцієнт дифузії може бути визначений за формулою Нечваля-Яблонського [8, 9]

$$\frac{D_e}{\nu} = 28,7 (\text{Re} \sqrt{\lambda})^{0,755}. \quad (7)$$

Для врахування зміни в'язкості середовища по довжині зони суміші запропоновано у формулах (6) і (7) число Рейнольдса і коефіцієнт гідравлічного опору визначати за в'язкістю п'ятдесятивідсоткової суміші  $\nu_c$ , яка обчислюється за формулою Кадмера [10]

$$\nu_c = \frac{\nu_1 + 3\nu_2}{4}, \quad (8)$$

де  $v_1, v_2$  – розрахункова кінематична в'язкість компонентів суміші ( $v_1 > v_2$ ).

У чинних на сьогодні нормах технологічного проектування нафтопродуктопроводів [11] для обчислення ефективного коефіцієнта дифузії рекомендується формула С'єнітцера, одержана на основі теоретичних і дослідно-промислових досліджень закономірностей послідовного перекачування світлич нафтопродуктів

$$D_e = 1,32 \cdot 10^7 U_o d \left( \frac{\lambda}{4} \right)^{3,6} \left( \frac{L}{d} \right)^{0,141}, \quad (9)$$

де  $L$  – довжина трубопроводу.

Для одержання емпіричних формул для ефективного коефіцієнта дифузії розроблено ряд методів [2]. У роботі [12] пропонується метод визначення коефіцієнта  $D_e$  на основі дослідних даних про об'єм і довжину зони суміші. Недоліками такого методу є: труднощі визначення граничних концентрацій, у яких фіксується суміш, неможливість врахування впливу первинної технологічної суміші на кінцевий результат сумішоутворення.

Кращі результати дає метод, який базується на визначенні дисперсії кривої розподілу концентрацій компонентів по довжині зони суміші. При експериментальному визначенні концентрацій компонентів найбільші похибки мають місце у “голові” і “хвості” суміші, що може вплинути на результати визначення дисперсії, а, отже, і ефективного коефіцієнта дифузії.

Практичного застосування набув спосіб визначення ефективного коефіцієнта дифузії, що базується на інтегральній характеристиці розподілу концентрацій, яка залежить від вибраних граничних концентрацій. Як інтегральна характеристика використовується сумарна кількість одного нафтопродукту, яка у вигляді домішки попадає в інший нафтопродукт [2,13].

**Висвітлення невивішених раніше частин загальної проблеми.** Дослідне визначення ефективного коефіцієнта дифузії дає змогу з'ясувати лише інтегральний процес масоперенесення для конкретних умов. Тому формули (6), (7), (9), одержані шляхом оброблення результатів експериментів, не можуть бути безпосередньо узагальнені для опису процесів сумішоутворення у потоках зі змінними параметрами (густиною, в'язкістю, температурою тощо). Саме такі умови мають місце у випадку послідовного перекачування нафт з суттєвою різницею фізико-хімічних властивостей. У таких випадках для визначення ефективного коефіцієнта дифузії перевагу слід віддавати аналітичному способу, який враховує структуру турбулентного потоку. Базою для одержання конкретних математичних моделей для ефективного коефіцієнта дифузії може бути аналітичний вираз (1), запропонований В.І. Мароном [1, 2]. Таким чином, у зв'язку з тим, що більшість математичних моделей для ефективного коефіцієнта дифузії одержані за умов послідовного перекачування світлич нафтопродуктів, питання обчислення зазначеного коефіцієнта при послідовно-

му перекачуванні нафт різних сортів вимагає додаткових досліджень, які виконані у даній роботі.

**Основний матеріал.** Вихідним рівнянням для одержання математичних моделей для ефективного коефіцієнта дифузії використовуємо формальний вираз (1).

Як зазначено авторами праць [1, 2, 3, 5], для одержання розрахункових моделей у базовий вираз (1) необхідно підставити відповідні математичні моделі для профілю швидкості і для коефіцієнта турбулентної дифузії.

Послідовне перекачування малов'язких нафт у магістральних нафтопроводах здебільшого відбувається у зоні змішаного тертя турбулентного режиму.

Для обчислення ефективного коефіцієнта дифузії при розвинутому турбулентному режимі у базовий вираз (1) будемо підставляти залежність для розподілу швидкостей по перерізу турбулентного потоку [1, 3]

$$\frac{U}{U_{\max}} = \left( \frac{y}{R} \right)^n, \quad (10)$$

де  $n$  – коефіцієнт математичної моделі

$$n = 0,9\sqrt{\lambda}, \quad (11)$$

$U_{\max}$  – максимальна по перерізу труби швидкість рідини.

Для вказаної зони турбулентного режиму зв'язок між середньою і максимальною по перерізу трубопроводу швидкістю рідини можна виразити формулою

$$\frac{U_{\max}}{U_o} = 1 + 1,3\sqrt{\lambda}. \quad (12)$$

Розв'язуємо спільно рівняння (10)-(12), у результаті чого одержуємо такий вираз для розподілу швидкостей по перерізу турбулентного потоку

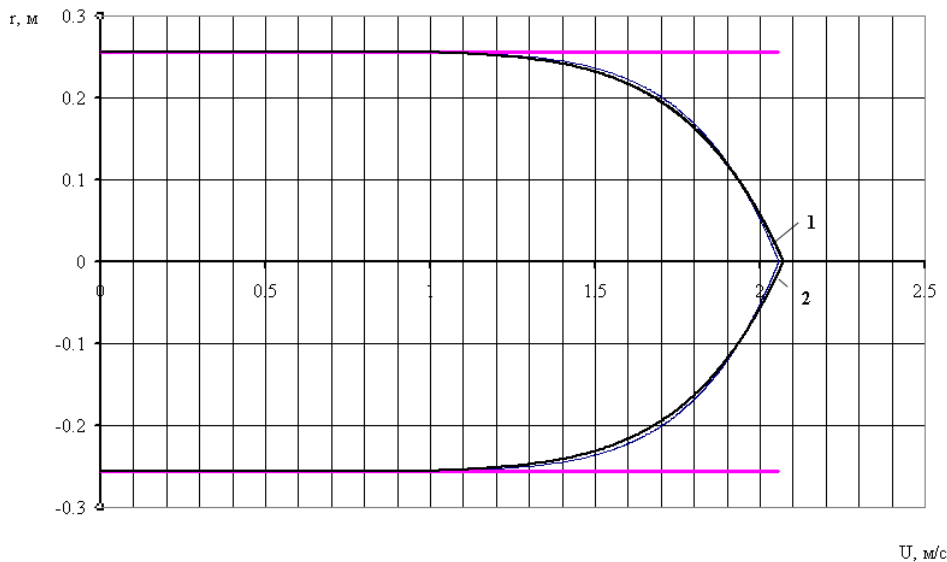
$$U = U_o (1 + 1,3\sqrt{\lambda}) \left( \frac{y}{R} \right)^n. \quad (13)$$

Переходимо від змінної  $y$  до змінної  $r$  за умовою  $r = R - y$ , тоді рівняння (12) набуде такого вигляду:

$$U = \frac{U_o (1 + 1,3\sqrt{\lambda})}{R^n} (R - r)^n. \quad (14)$$

На основі розрахунків, проведених за формулами (10)-(14), за допомогою програмного забезпечення Excel, побудовані профілі швидкостей турбулентного потоку в зоні змішаного тертя за умов перекачування нафт з розрахунковою кінематичною в'язкістю  $v_1 = 2$  сСт і  $v_2 = 20$  сСт для нафтопроводу з внутрішнім діаметром 0,513 м (рисунк 1).

Аналіз графіків, наведених на рисунку 1, свідчить, що в'язкість рідини за умови перекачування у зоні змішаного тертя турбулентного режиму практично не впливає на розподіл швидкостей по перерізу труби. Це дає змогу прогнозувати значно меншу залежність вели-



1 - профіль швидкості за розрахункової в'язкості 2 сСт;  
2 - профіль швидкості за розрахункової в'язкості 20 сСт

**Рисунок 1 - Розподіл швидкостей по перерізу труби за умов перекачування рідини у зоні змішаного тертя**

чини ефективного коефіцієнта дифузії від розрахункової в'язкості.

Внутрішній інтеграл у формулі (1) для ефективного коефіцієнта дифузії позначимо  $I_1$

$$I_1 = \int_r^R (U - U_o) r dr. \quad (15)$$

Ця формула з врахуванням математичної моделі (14) для розподілу швидкостей по перерізу труби набуде такого вигляду

$$I_1 = \int_r^R U_o r [\Omega (R - r)^n - 1] dr, \quad (16)$$

де  $\Omega$  – комплекс таких параметрів

$$\Omega = \frac{(1 + 1,3\sqrt{\lambda})}{R^n}. \quad (17)$$

Гradient швидкості в турбулентному потоці знаходимо шляхом диференціювання наведеного вище виразу для профіля швидкості

$$\frac{dU}{dr} = -U_o \Omega n (R - r)^{n-1}. \quad (18)$$

Формула для визначення ефективного коефіцієнта турбулентної дифузії з врахуванням гіпотези Бусинеска

$$D_t = -U_*^2 \frac{r}{R} \left( \frac{dU}{dr} \right)^{-1} \quad (19)$$

та виразу (18) набуває такого вигляду

$$\varepsilon = \frac{r U_*^2}{R U_o \Omega \cdot n (R - r)^{n-1}}. \quad (20)$$

Формулу для зовнішнього інтеграла у виразі (1) можна представити таким чином

$$I_2 = \frac{R U_o \Omega \cdot n}{U_*^2} \int_0^R \frac{(R - r)^{n-1} I_1^2 dr}{r^2}. \quad (21)$$

Внутрішній інтеграл  $I_1$  запишемо у вигляді

$$I_1 = \int_r^R U_o r [\Omega (R - r)^n - 1] dr =$$

$$\int_r^R U_o r \Omega (R - r)^n dr - \int_r^R U_o r dr =$$

$$\int_r^R U_o r \Omega (R - r)^n dr - \frac{U_o}{2} (R^2 - r^2).$$

Інтеграл  $\int_r^R U_o r \Omega (R - r)^n dr$  можна взяти частинами, позначивши

$$u = r, \text{ тоді } du = dr,$$

$$dv = (R - r)^n dr, \text{ тоді } v = -\frac{(R - r)^{n+1}}{n + 1}.$$

Згідно з правилами інтегрування частинами, маємо

$$\int u dv = uv - \int v du,$$

$$\int_r^R r (R - r)^n dr = -r \frac{(R - r)^{n+1}}{n + 1} + \int_r^R \frac{(R - r)^{n+1}}{n + 1} dr. \quad (22)$$

У результаті математичних перетворень виразу (22), одержуємо

$$\int_r^R r (R - r)^n dr = -r \frac{(R - r)^{n+1}}{n + 1} + \frac{(R - r)^{n+2}}{(n + 1)(n + 2)}. \quad (23)$$

Таким чином, аналітичний вираз залежності значення внутрішнього інтеграла  $I_1$  від значення нижньої границі інтегрування  $r$  набуде такого вигляду:

Таблиця 1—Результати розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії в зоні змішаного тертя турбулентного режиму

Розрахункова в'язкість $\nu$ , сСт	Число Рейнольдса Re	Коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda$	Динамічна швидкість турбулентності $U_*$ , м/с	Ефективний коефіцієнт дифузії $D_e$ , м <sup>2</sup> /с
18	34200	0,0243	0,06612	0,240
12	51300	0,0224	0,06348	0,226
10	61560	0,0216	0,06239	0,220
8	76950	0,0208	0,06116	0,214
5	123120	0,0193	0,05890	0,203
2	307800	0,0173	0,05589	0,188

$$I_1 = U_o \Omega \left[ \frac{(R-r)^{n+2}}{(n+1)(n+2)} - \frac{(R-r)^{n+1}}{n+1} \right] - \frac{U_o}{2} (R^2 - r^2). \quad (24)$$

Формула (22) для зовнішнього інтеграла у виразі (1) може бути записана у такому вигляді

$$I_2 = \frac{RU_o \Omega \cdot n}{U_*^2} \int_0^R \left\{ \frac{(R-r)^{n-1}}{r^2} U_o^2 \left[ \frac{\Omega(R-r)^{n+1}}{(n+1)} r + \frac{\Omega(R-r)^{n+2}}{(n+1)(n+2)} + \frac{r^2}{2} - \frac{R^2}{2} \right]^2 \right\} dr. \quad (25)$$

Середнє значення коефіцієнта турбулентного перенесення  $\varepsilon_o$  знаходимо за формулою (22) з врахуванням (20)

$$\varepsilon_o = I_3 = \frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{U_*^2 r^2 dr}{RU_o \Omega n (R-r)^{n-1}}. \quad (26)$$

Початковий математичний вираз (1) для ефективного коефіцієнта дифузії з врахуванням прийнятих моделей і позначень також зводиться до загального вигляду (26) [2, 3].

Наведений вище алгоритм реалізований нами в програмі DEZM, яка дає можливість визначати значення ефективного коефіцієнта дифузії у зоні змішаного тертя турбулентного режиму за відомих геометричних характеристик нафтопроводу, режимних параметрів перекачування та розрахункової в'язкості транспортних нафт. Визначені інтеграли  $I_2$  та  $I_3$  обчислюються чисельним інтегруванням за методом Сімпсона. При цьому враховується, що вказані інтеграли є невласними інтегралами. Інтеграл  $I_3$  має особливість, якщо  $r = R$ . Використовуючи правило інтегрування невласних інтегралів для обчислення інтеграла  $I_3$  границю інтегрування  $R$  замінюємо на  $R - \delta$  за умовою  $\delta \leq k_e$ . Інтеграл  $I_2$  має особливість при  $r=0$ , коли підінтегральна функція прямує до нескінченності. Аналіз свідчить, що математичні моделі для опису структури турбулентного потоку неадекватно описують зміну швидкості біля осі потоку, тобто, при малих значеннях координати  $r$ . Результати експериментальних досліджень

розвинутого турбулентного потоку свідчать, що у центральній частині потоку швидкості руху рідини практично однакові, тобто не відповідають закономірностям, наведеним на рис. 1. Це свідчить про необхідність відповідної модифікації підінтегрального виразу у формулі (26) для приведення математичних моделей у відповідність з фізичними процесами масопереносу в турбулентному потоці рідини. Використовуючи правило інтегрування невласних інтегралів, запишемо

$$I_2 = \int_{\delta}^R F dr + \int_0^{\delta} F_m dr, \quad (27)$$

де  $F$  – підінтегральна функція відповідно до формули (26);

$F_m$  – підінтегральна функція після модифікації у відповідності до реальних процесів масопереносу поблизу осі труби.

Шляхом математичного моделювання за допомогою ПЕОМ знайдено, що для одержання адекватних результатів величина  $\delta$  у формулі (27) повинна складати 4-5 мм, а модифікована підінтегральна функція має експоненціальний характер.

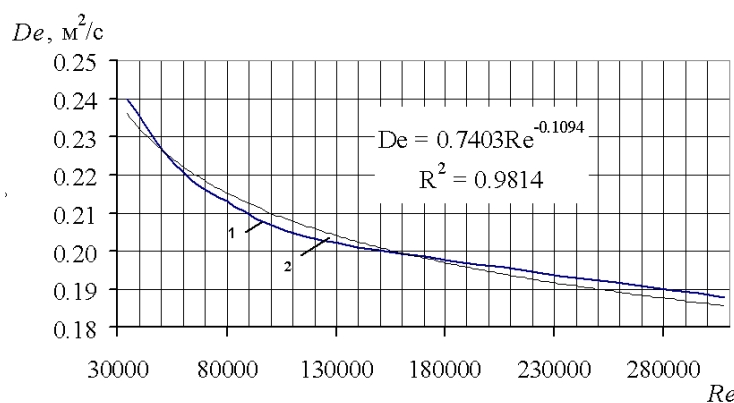
За програмою DEZM проведемо дослідження залежності величини ефективного коефіцієнта дифузії від значення розрахункової в'язкості нафти і числа Рейнольдса. Діапазон в'язкості вибираємо такий, який може мати місце при послідовному перекачуванні нафт різних сортів у зоні змішаного тертя турбулентного режиму. Результати багатоваріантних розрахунків наведені в таблиці 1, а також на рисунках 2, 3.

Як видно з рисунків 2 і 3, залежність ефективного коефіцієнта дифузії від розрахункової в'язкості та числа Рейнольдса при послідовному перекачуванні нафт різних сортів у зоні змішаного закону тертя можна представити у вигляді таких формул:

$$D_e = 0,7403 Re^{0,1094}, \quad (28)$$

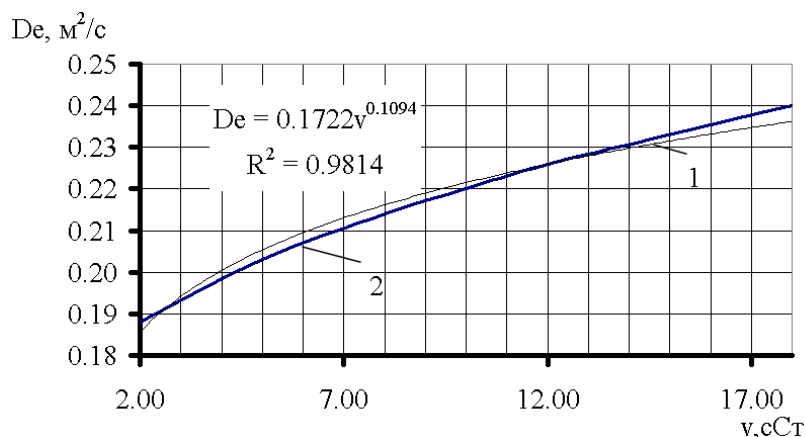
$$D_e = 0,1722 \nu^{0,1094}. \quad (29)$$

Якщо представити дані таблиці 1 у вигляді універсальної моделі (21), то після обчислення середніх значень коефіцієнтів моделі розрахункова формула для визначення ефективного ко-



1 – розрахункова крива, 2 – результати математичного моделювання

**Рисунок 2 – Залежність ефективного коефіцієнта дифузії від числа Рейнольдса для зони змішаного тертя**



1 – розрахункова крива, 2 – результати математичного моделювання

**Рисунок 3 – Залежність ефективного коефіцієнта дифузії від числа в'язкості нафти для зони змішаного тертя**

**Таблиця 2 – Порівняння результатів розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії для зони змішаного тертя, одержаних за програмою DEZM і за формулою (30)**

Розрахункова в'язкість $\nu$ , сСт	Число Рейнольдса $Re$	Ефективний коефіцієнт дифузії за програмою DEZM, $m^2/s$	Ефективний коефіцієнт дифузії за формулою (30), $m^2/s$	Відносна похибка результатів, %
18	34200	0,240	0,234	-2,3
12	51300	0,226	0,224	-0,9
10	61560	0,220	0,219	-0,3
8	76950	0,214	0,214	0
5	123120	0,203	0,203	0
2	307800	0,188	0,183	-2,4

ефіцієнта дифузії в зоні змішаного закону тертя набуде вигляду

$$D_e = 1,29 \left( \frac{4Q}{\pi \cdot d} \right)^{1-0,112} \nu^{0,112}. \quad (30)$$

Порівнюємо між собою результати розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії, одержані за програмою DEZM і за формулою (30). Результати порівняння зводимо у таблицю 2.

Як видно з таблиці 2, для діапазону розрахункової в'язкості послідовно транспортованих

рідин у діапазоні від 18 до 2 сСт відносна різниця результатів розрахунку не перевищує 3%. Це свідчить про можливість використання математичної моделі (30) для практичних розрахунків параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів у зоні змішаного тертя турбулентного режиму. За необхідності виконання уточнених розрахунків величини ефективного коефіцієнта дифузії перевагу слід віддавати використанню розробленої нами програми DEZM [14].

**Наукова новизна.** Встановлено вплив структури турбулентного потоку на інтенсивність масообмінних процесів в нафтопроводі і одержані аналітичні залежності для ефективного коефіцієнта дифузії з врахуванням специфіки послідовного перекачування нафт різних сортів у зоні змішаного закону тертя.

**Практична цінність отриманих результатів.** Запропоновані у даній роботі залежності та програмне забезпечення для визначення ефективного коефіцієнта дифузії у зоні змішаного закону тертя доцільно рекомендувати для впровадження у розрахунки специфічних параметрів послідовного перекачування різносортих нафт малої в'язкості, що залежать від інтенсивності сумішоутворення, а також для використання у навчальному процесі при вивченні відповідних дисциплін.

**Висновки.** Одномірна модель повздовжньої турбулентної дифузії і похідні від неї формули для розподілу концентрацій, визначення об'єму суміші, її розкладання у резервуари можуть бути використані як при послідовному перекачуванні світлих нафтопродуктів, так і при послідовному перекачуванні нафт різних сортів. При цьому у всі розрахункові формули слід підставляти ефективний коефіцієнт дифузії, який враховує специфічність умов взаємного змішування нафт малої в'язкості з суттєвою різницею фізико-хімічних властивостей. В результаті багатоваріантних розрахунків отримано аналітичні залежності для визначення ефективного коефіцієнта дифузії для змішаного закону тертя. Дана модель є зручною для практичних розрахунків параметрів послідовного перекачування нафт різних сортів у магістральних нафтопроводах, в тому числі зі складною геометрією.

Можливим напрямком подальших досліджень слід вважати удосконалення запропонованих моделей та застосування методів і процедур, викладених у даній роботі, для отримання універсальних математичних моделей ефективного коефіцієнта дифузії незалежно від зони гідравлічного тертя турбулентного режиму.

### Література

- 1 Марон В. И. Об эффективном коэффициенте смешения при последовательной перекачке в неизотермических условиях / В.И. Марон, В.А. Юфин // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1974. – № 9. – С. 23-26.
- 2 Лурье М. В. Оптимизация последовательной перекачки нефтепродуктов / В.И. Марон, Л.А. Мацкин Л. А. – М.: Недра, 1979. – 250 с.
- 3 Люта Н.В. Эффективный коэффициент дифузії в послідовному перекачуванні різносортих нафт: експериментальна верифікація / Н.В. Люта, І.В. Якимів, М.Д.Середюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 2 (55). – С. 74–81.
- 4 Середюк М.Д. Розробка математичних моделей для ефективного коефіцієнта змішування у зоні гідравлічно гладких труб / М.Д.Середюк, Н.В. Люта // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. – Вип. 35. Том 1. – С. 183–188.
- 5 Середюк М.Д. Теоретичні моделі для визначення ефективного коефіцієнта змішування при послідовному перекачуванні різносортих нафт у зоні змішаного тертя // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1998. – Вип. 35, Том 3. – С. 17-21.
- 6 Taylor G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. – Proc. Roy. Soc. – 1954. – Vol. A 223, № 1155. – pp. 447-468.
- 7 Яблонский В. С. О турбулентной диффузии в трубах / В.С. Яблонский, А.Ш. Асатурян, И.Х. Хизгилов // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. 3. – № 3. – С. 117-122.
- 8 Нечваль М. В. Последовательная перекачка нефтей и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам / М. В. Нечваль, В. Ф. Новоселов, П. И. Тугунов. – М.: Недра, 1976. – 220 с.
- 9 Нечваль М. В. Анализ формул для определения коэффициента турбулентной диффузии / М. В. Нечваль, Л. В. Назимов // Научн. техн. сб. Уфимского нефтяного института. – 1969, – Вип. 3. – С. 173-177.
- 10 Яблонский В. С. Проектирование, эксплуатация и ремонт нефтепродуктопроводов / В. С. Яблонский, В. Ф. Новоселов, В. Б. Галеев, Г. З. Закиров. – М.: Недра, 1965. – 410 с.
- 11 Нормы технологического проектирования разветвленных нефтепродуктопроводов (ВНТП-3-90) / Введ. 1990. – Разраб. ГипроНИИнефтегазтранс, МИНГ им. И. М. Губкина. – М., 1991. – 89 с.
- 12 Пархоменко Р. С. Повышение эффективности системы обеспечения нефтепродуктами. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
- 13 Лурье М. В. Средства транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов за рубежом. – [Тематический обзор] / М. В. Лурье, В. И. Марон // Сер. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М.: ЦНИИЭ-нефтехим, 1973. – 22 с.
- 14 Люта Н.В. Методи технологічних розрахунків нафтопроводів при послідовному перекачуванні різносортих нафт: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.13 «Нафтогазопроводи, бази та сховища» / Н.В. Люта. – Івано-Франківськ, 2003. – 20, [1] с.
- 15 Якимив И.В. Оптимизация последовательной перекачки нефтепродуктов с жидкостными разделителями: дис. канд. техн. наук: / Якимив Иосип Васильевич. – Ивано-Франковск, 1983 – 183 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
05.11.15

Рекомендована до друку  
професором Грудзом В.Я.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Банахевичем Ю.В.  
(відділ магістральних газопроводів і газорозподільчих станцій ПАТ «Укртрансгаз», м. Київ)